第45卷 第6期
2022年11月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 45 No. 6
Nov. 2022

# 京藏高速青海东部地区汛期路面水膜厚度变化特征及预报模型构建

代青措[1,2]， 保广裕[2]， 祁栋林[3]， 李永花[2]， 刘佳茹[2]， 张 静[2]， 李宝华[2]

（1. 青海省防灾减灾重点实验室，青海 西宁 810001；2. 青海省气象服务中心，青海 西宁 810001；
3. 青海省气象科学研究所，青海 西宁 810001）

**摘 要**：利用2018—2020年汛期（5—9月）京藏高速青海省公路沿线交通自动监测站逐小时气象观测资料，研究路面水膜厚度变化特征，构建水膜厚度与气象因子的预报模型。结果表明：（1）京藏高速公路高庙桥站和汉庄村站逐小时路面水膜厚度主要分布均在0.0~0.2 mm之间，频率分别为66.0%和63.0%，大于0.5 mm以上的路面水膜厚度频率均较小（10.0%），2站均属于强变异性地区。（2）采用相对阈值法统计分析，发现2站路面水膜厚度在0.1 mm以内的比例分别为33.8%和36.3%，路面水膜厚度在0.1~0.6 mm之间的比例分别为59.2%和56.0%，路面水膜厚度大于0.7 mm以上即易发生水滑，引起车辆失稳、失控等危险的比例分别为7.0%和7.6%。（3）路面水膜厚度日变化和月变化特征明显。高庙桥站和汉庄村站水膜厚度的月变化均呈弱双峰性，2站的月变化趋势不完全一致。高庙桥站的日变化峰值出现在02:00—06:00，低谷出现在14:00—16:00，汉庄村站日变化峰值出现在06:00，低谷出现在16:00。（4）随着降水强度的增加，平均水膜厚度均遵循幂函数关系迅速增加；在降水强度0.00~1.75 mm·h$^{-1}$之间时，平均水膜厚度增加趋势明显，降水强度大于1.76 mm·h$^{-1}$平均水膜厚度变化有增有减。（5）采用多元回归统计方法建立依据气象因子和不同降水强度下分别构建的水膜厚度模型具有较好的使用价值，可在实际业务工作中推广应用。（6）不同降水强度下构建的水膜厚度模型计算值明显高于季天剑模型和罗京模型，本文模型与罗京模型变化趋势较为一致，水膜厚度随降雨强度增加增长趋势明显，季天剑模型水膜厚度计算值随降雨强度增加增长趋势缓慢。研究成果可应用于高原环境雨天车速管理和路面交通安全管理，能够为公路设计人员或运营管理人员提供辅助决策的依据。

**关 键 词**：水膜厚度；降水量；预报模型；京藏高速

**文章编号**：1000－6060(2022)06－1814－10(1814～1823)

公路表面由于降雨在重力作用下沿着合成坡度方向运动，于道路表面形成水膜。车辆在公路上高速行驶时，由于水膜的润滑作用，产生的动水压力导致轮胎与路面的接触面积减少，车辆行驶时安全系数显著降低，易发生车辆侧滑等交通事故[1]。当水膜厚度较深时，只要汽车的行驶速度超过某一临界速度，车辆的前轮就会发生水漂。路表的水膜厚度越厚，汽车行驶过后溅起的水雾就会越高，由于动水压力的影响，轮胎与路面附着系数降低越快，轮胎越容易发生水漂现象，导致汽车的转向、制动性能越差，极易发生交通事故。动水压力的大小与行车速度、道路表面水膜厚薄和轮胎花纹深度有关，影响贡献率由大到小为行车速度、水膜厚度和花纹深度。为了降低公路上高速行驶车辆发生交通事故的风险，研究公路表面水膜厚度的变化特征及其预报模型是非常必要的举措。目前，国内外诸多学者从20世纪50年代开始，建立了各种不同形式的水膜厚度预测模型[2-5]，影响路面水膜厚度的主要因素有降雨强度、坡面长度、坡面坡度和坡面的粗糙深度。采用人工模拟和基于人工神经网的道

**收稿日期**：2022-03-08； **修订日期**：2022-06-06
**基金项目**：青海省创新平台建设专项（2022-ZJ-Y11）；青海省基础研究计划项目（2021-ZJ-762）；青海省防灾减灾重点实验室开放基金项目（QFZ-2021-M03）资助
**作者简介**：代青措（1982-），女，高级工程师，主要从事专业气象预报和服务研究. E-mail: 147463703@qq.com
**通讯作者**：保广裕（1967-），男，正研级高工，主要从事专业气象预报和服务研究. E-mail: 985022892@qq.com

路表面水膜厚度，提出具体的检验路面水膜厚度的计算模型，计算得到路面水膜厚度的限制标准可取一般值2.5 mm，极限值4 mm[6-7]。

随着高速公路快速发展，高速公路交通安全事故越来越多，给人民生命财产带来巨大损失。恶劣天气是高速公路道路交通事故发生的重要诱因，交通事故与气候背景有一定联系[8-9]，国内外很多气象专家对气象因素影响交通的现状及特征做了研究[10-15]，建立了针对交通气象预警预报模型和服务系统[16-17]，构建了交通气象服务指标体系方法，总结出公路交通降水的评估方法[18-20]。京藏高速公路青海段是丝绸之路经济带的必经之路，青海境内主要途径享堂大桥省界—民和—乐都—平安—西宁—湟源—共和—大水桥—茶卡—都兰—格尔木市—格尔木南出口收费站。沿线地形复杂多样，自然条件较差，气象灾害较多[21]，因"一带一路"经济带需求，青海建立了2个公路交通气象站，弥补了公路路面水膜厚度观测数据的空白区，针对交通路段水膜厚度的气象监测站点明显稀少，对于路面水膜厚度变化特征以及与降水量关系的气象研究甚少，严重缺乏对公路路面水膜厚度变化特征及预报模型等方面的研究。本文利用2018—2020年汛期5—9月京藏高速乐都区高庙桥站和汉庄村站交通自动监测站资料，分析了高庙桥站和汉庄村站路面水膜厚度变化特征以及水膜厚度与气象因子之间的关系，建立了路面水膜厚度的预报模型，以提高公路交通预报服务精细化，为交通运输安全和畅通提供精细化服务产品。

## 1　资料和方法

### 1.1　研究区概况

乐都区位于青海省东部，湟水河中下游，全区海拔1850~4480 m之间，降水较少，气候干旱，年平均气温为7.8 ℃，年均降水量为329.1 mm，降水时空分布不均，其中6—9月降水占全年的70%以上。高庙桥站位于京藏高速K1736+900 m处102°32′27″E，36°26′18″N之间，海拔高度1882 m，汉庄村站位于京藏高速K1761+950 m处102°16′44″E，36°29′18″N之间，海拔高度2029 m（图1）。

### 1.2　资料来源

京藏高速公路沿线高庙桥站和汉庄村站CAWS3000交通自动气象观测站2017年11月建设完成并运行。公路交通气象观测站主要设备配置型号如表1所示。实现实时监测公路沿线逐小时降水、气温、湿度、风速、路面温度和路面状况等8要素数据，资料来源于青海省气象信息中心。

### 1.3　统计分析方法

因交通气象站降水分辨率为0.1 mm，且路面水膜只有在降水发生时产生，故在数据统计分析过程中降水量小于0.1 mm时的水膜厚度数据不参与统计。

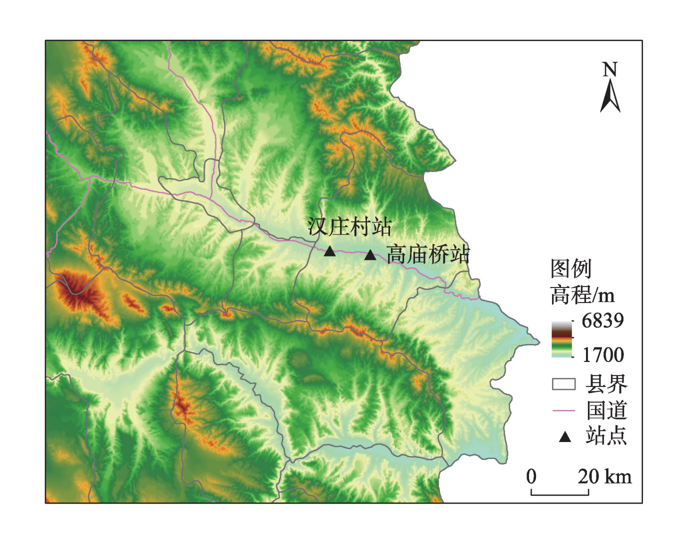



图1　研究区国道及气象站点分布

Fig. 1　Distribution of national roads and meteorological stations in the study area

表1　公路交通气象观测站技术性能指标

Tab. 1　Technical performance index of highway traffic meteorological observation stations

| 设备型号 | 测量要素 | 范围 | 分辨率 | 准确度 |
|---|---|---|---|---|
| 温湿度传感器DHC2 | 气温/℃ | −50~60 | 0.1 | ±0.1 |
| | 相对湿度/% | 0~100 | 1.0 | ±2.0（≤90%）、±3.0（>90%） |
| 风向风速传感器ZQZ-TF | 风速/m·s$^{-1}$ | 0~75 | 0.1 | ±（0.3+0.03 V） |
| 雨量传感器SL3-1 | 降水量/mm | 0~400（固态）<br>0~999.9（液态） | 0.1 | ±0.4（≤10 mm）、±4.0（>10 mm） |
| 路面温度传感器ZQZ-TW120 | 路面温度/℃ | −60~80 | 0.1 | ±0.2 |
| 道面状况传感器WUSH-IRS31 | 水膜厚度/mm | 0.00~10.00 | 0.01 | − |

利用统计学等方法分析了路面水膜厚度的变化特征，利用SPSS软件采用多元线性逐步回归法建立路面水膜厚度与气象因子的回归方程，并进行$F$检验。采用平均偏差(MBE)、均方根误差(RMSE)和相关系数($r$)指标对实测值与预报方程拟合值进行比较。计算公式如下：

$$\mathrm{MBE}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(X_i-Y_i) \tag{1}$$

$$\mathrm{RMSE}=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(X_i-Y_i)^2} \tag{2}$$

$$r=\frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i-\bar{X})(Y_i-\bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(X_i-\bar{X})^2}\times\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(Y_i-\bar{Y})^2}} \tag{3}$$

$$C_v=\frac{\sigma}{\mu} \tag{4}$$

式中：$n$为样本数；$X_i$为观测值；$Y_i$为拟合值；$\bar{X}$为观测值的平均值；$\bar{Y}$为拟合值的平均值；$\sigma$为标准差；$\mu$为平均值。变异系数($C_v$)的大小可描述路面水膜厚度的变异程度，$C_v$大意味着路面水膜厚度大小在时间分布上不均匀特征明显。$C_v<0.1$表示呈弱变异性，$C_v>1.0$表示呈强变异性，$0.1\leqslant C_v\leqslant 1.0$表示呈中等变异性。

## 2 结果与分析

### 2.1 水膜厚度变化特征

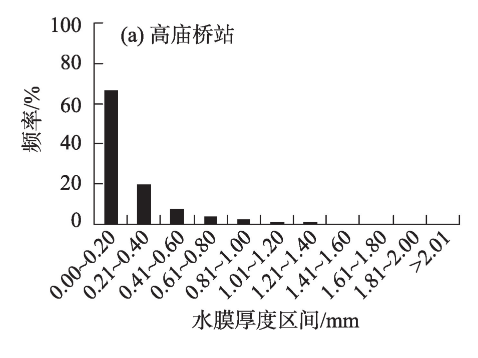
**2.1.1 频率分布情况和水膜厚度指数等级划分** 从图2可以得出，2018—2020年汛期5—9月京藏高速公路高庙桥站和汉庄村站逐小时路面水膜厚度进行统计分析，发现2站水膜厚度在0.0~0.2 mm之间的频率分别为66.0%和63.0%，0.2~0.4 mm之间的频率分别为19.4%和19.7%，0.5 mm以上的频率小于10.0%。水膜厚度均值高庙桥站为0.215，汉庄村站为0.225；$C_v$分别为1.20和1.13，均属于强变异性，2站的水膜厚度取值范围，高庙桥站0.0~1.4 mm之间，汉庄村站0.0~1.2 mm之间。

极端事件是指某一地区从统计分布观点看极少发生的天气事件。关于极端阈值的选取，目前主要有两种方法，即绝对阈值和相对阈值。绝对阈值法即选择某一要素的绝对值大于等于或者小于等于某一特定值的方法。相对阈值一般采用排位法计算，对指标历史序列从小到大排列，定义序列第95(或第90)百分位值为极端多事件，第5(或第10)百分位值为极端少事件。由于极端天气事件具有很强的地域特征，各地的变化趋势与强度并不完全一致且差异较大。

根据高庙桥站和汉庄村站逐小时水膜厚度观测值和预报服务实际需求，对水膜厚度值采用相对阈值法(10%、50%和90%)进行统计分析，来定性说明水膜厚度对安全行车的影响程度进行评价，具体划分标准及影响参见表2。

按表2分级划分标准对2018—2020年汛期5—9月京藏高速公路高庙桥站和汉庄村站逐小时路面水膜厚度进行统计分析，发现2站水膜厚度在正常可接受范围内的比例分别为33.8%和36.3%，需考虑水膜影响程度差的比例分别32.5%和26.5%，较差的比例分别为26.7%和29.5%，易发生水滑，引起车辆失稳、失控等危险的比例分别为7.0%和7.6%。

**2.1.2 时间变化特征** 图3和图4分别给出了汛期高庙桥站和汉庄村站平均水膜厚度月变化和日变化。高庙桥站和汉庄村站水膜厚度的月变化均呈弱双峰性，2站的月变化趋势不完全一致。高庙桥站最大值和次大值分别出现在5月和7月，最小值出现在6月，而汉庄村站最大值出现在8月，最小值



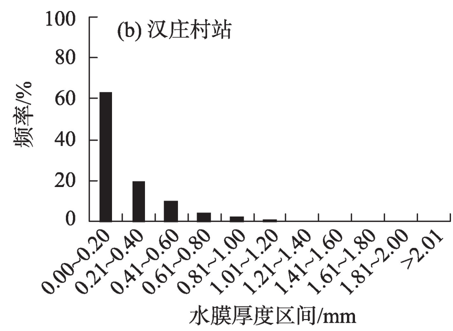



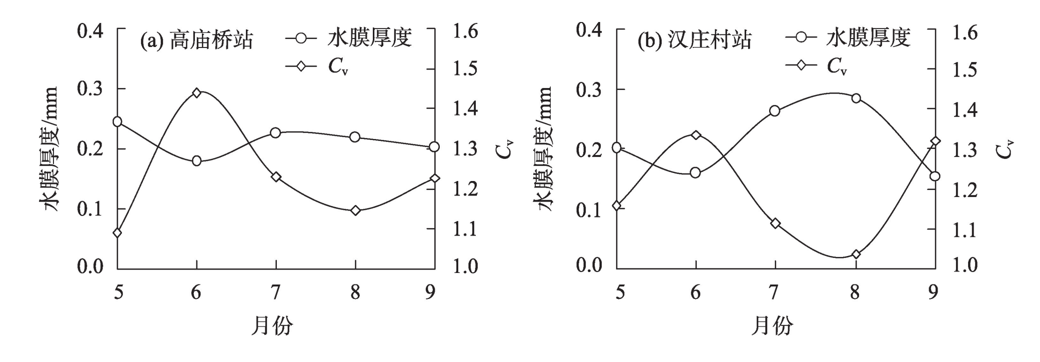

图2 高庙桥站和汉庄村站水膜厚度频率

Fig. 2 Frequency distributions of water film thickness at Gaomiaoqiao station and Hanzhuangcun station

**表2　公路路面水膜厚度指数等级划分及对应措施**

**Tab. 2　Classification and corresponding measures of water film thickness index of highway pavement**

| 级别 | 影响程度 | 划分标准 | 比例/% | 对应措施 |
|---|---|---|---|---|
| 1级 | 正常 | 路面水膜厚度在0.1 mm以内 | 35.1 | 可接受 |
| 2级 | 差 | 路面水膜厚度在0.1~0.2 mm之间 | 29.5 | 需考虑水膜影响 |
| 3级 | 较差 | 路面水膜厚度在0.3~0.6 mm之间 | 28.1 | 需考虑水膜影响 |
| 4级 | 很差 | 路面水膜厚度大于0.7 mm以上 | 7.3 | 易发生水滑,引起车辆失稳、失控等危险 |




注：$C_v$为变异系数。下同。

图3　汛期高庙桥站和汉庄村站水膜厚度月变化

Fig. 3　Monthly variation of water film thickness at Gaomiaoqiao station and Hanzhuangcun station in flood season

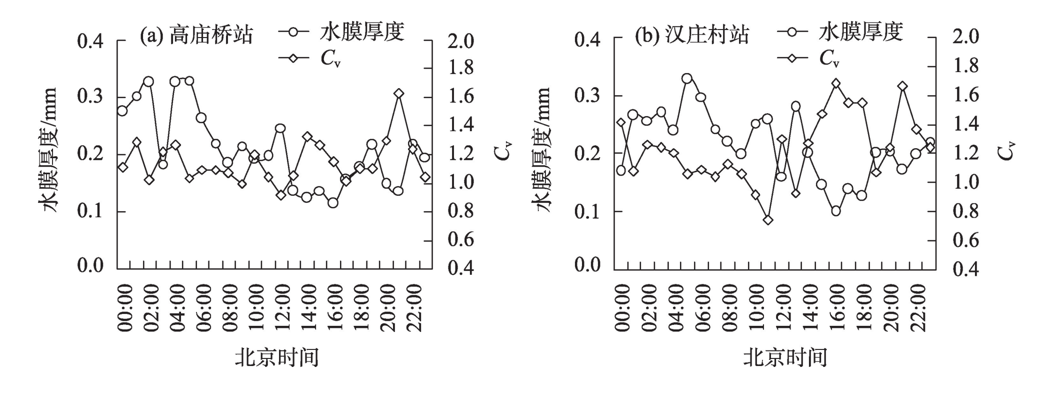



图4　汛期高庙桥站和汉庄村站水膜厚度日变化

Fig. 4　Diurnal variation of water film thickness at Gaomiaoqiao station and Hanzhuangcun station in flood season

出现在6月。$C_v$的变化与水膜厚度的变化相反，均属于强变异性。从图4可以看出，高庙桥站水膜厚度在0.11~0.33 mm之间，汉庄村站在0.10~0.33 mm之间。高庙桥站的日变化峰值出现在02:00—06:00，次峰值出现在12:00和19:00，低谷出现在14:00—16:00；汉庄村站日变化峰值出现在06:00，次峰值出现在13:00，低谷出现在16:00。与计晓龙等[22]和刘蓉娜等[23]分别在青藏高原和湟水河谷（与本研究区域重合）得出的降水强度日变化表现为双峰特征，主峰值出现在05:00左右，谷值出现在15:00左右的特征对应。

### 2.2　不同等级降水强度下的水膜厚度变化

单位时间的降水量被称为降雨强度，根据1 h降水量的大小将降雨强度按两种方式划分成不同等级来统计水膜厚度的变化。第一种按照高庙桥站和汉庄村站2站的实际小时降水量，按0.25 mm·h$^{-1}$为间隔划分为17区间（图5a和图5b）；第二种依据文献[22]分成不同等级降水强度：小雨（0.10~0.25 mm·h$^{-1}$）、中雨（0.26~1.00 mm·h$^{-1}$）、大雨（1.01~4.00 mm·h$^{-1}$）和暴雨以上（≥4.01 mm·h$^{-1}$）（图5c、图5d）。可以发现，随着降水强度的增加，水膜厚度均遵循幂函数关系迅速增加，其中高庙桥站两种统计方式

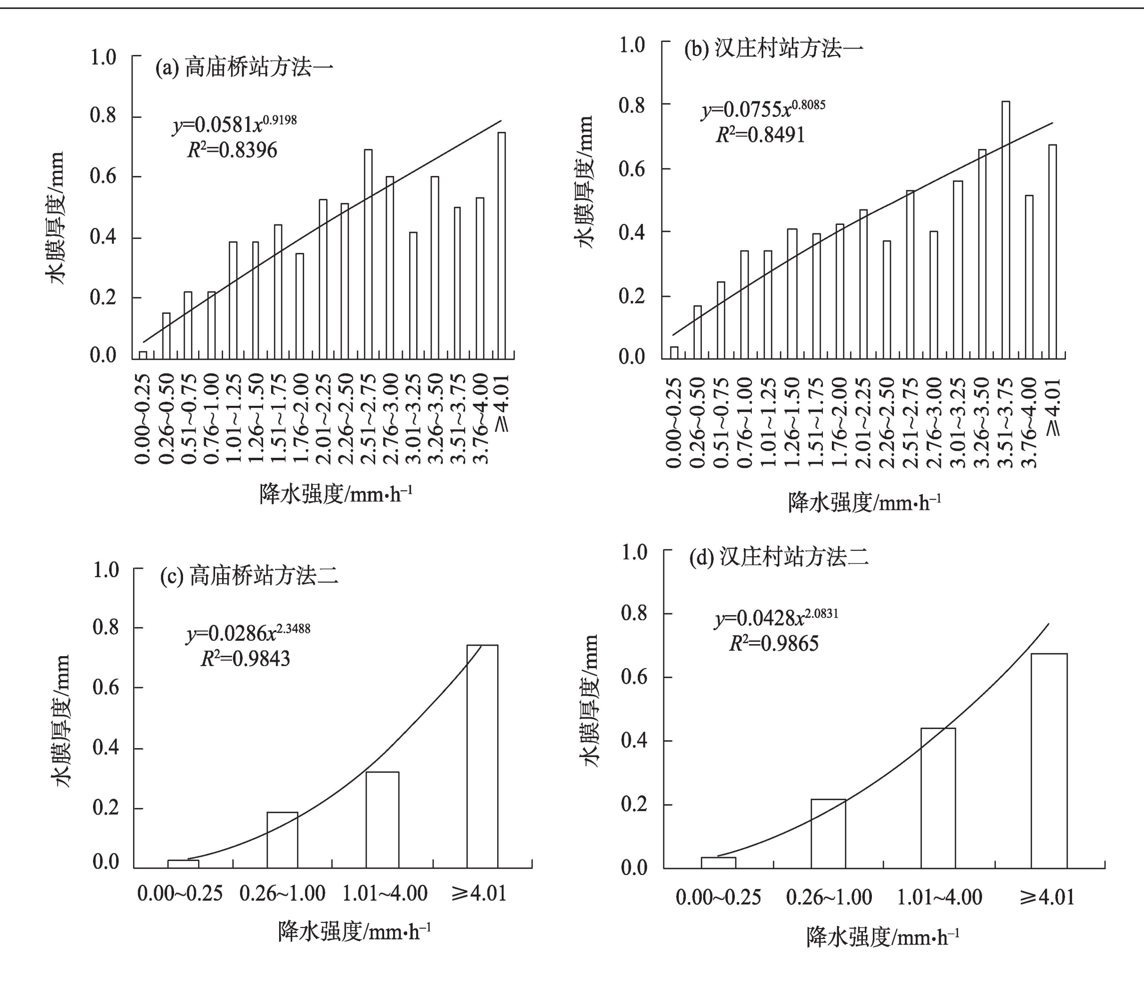



图5　高庙桥站和汉庄村站不同降水强度条件汛期水膜厚度变化

Fig. 5　Changes of water film thickness in flood season at Gaomiaoqiao station and Hanzhuangcun station under different precipitation intensities

中水膜厚度指数分别为0.9198和2.3488，汉庄村站两种统计方式中水膜厚度指数分别为0.8085和2.0831，根据两种水膜厚度幂指数的数值和相关系数，说明高庙桥站和汉庄村站均是第二种方式水膜厚度的增加速率最大。在图5a和图5b中还可以发现，降水强度在0.00~1.75 mm·h$^{-1}$之间，随降水强度增加水膜厚度增加趋势明显，降水强度大于1.76 mm·h$^{-1}$水膜厚度变化趋势有增有减，且2站增减对应的降水强度略有不同，高庙桥站降水强度在1.76~2.00 mm·h$^{-1}$时略有减小后再次进入快速增大，在2.60~2.75 mm·h$^{-1}$后再次进入减小，汉庄村站降水强度在1.76~3.00 mm·h$^{-1}$时呈波动状态，然后进入快速增大。

## 2.3　路面水膜厚度预报模型的建立和检验

从2.1和2.2节高庙桥站和汉庄村站水膜厚度的变化特征分析来看，2站在月际变化中高低值出现月份略有不同，但波动幅度较小，其频率分布和日变化特征基本一致，考虑2站样本数较少，故将2站数据合并进行路面水膜厚度预报模型的建立并预留部分样本进行检验。

**2.3.1　水膜厚度与气象因子的相关分析及预报模型**　表3给出了水膜厚度与主要气象因子的相关性，可以看出，小时降水量、小时相对湿度和前1 h水膜厚度与水膜厚度呈现显著的正相关性，而小时气温与水膜厚度呈负相关性，均通过0.05的显著性检验，小时风速和路面温度对水膜厚度影响较小。

建立在统计模型基础上的水膜预报模型的稳定性和准确性，取决于预报因子的选取。利用2018—2020年5—9月高庙桥站和汉庄村站小时数据，风速、气温、相对湿度、路面温度、降水量、前1 h水膜厚度和水膜厚度为建模的基础数据（预留出一定数量的样本作为后期预报方程的检验），利用SPSS软件，采用多元逐步回归建立水膜厚度与气象

表3 水膜厚度与主要气象因子的相关性

Tab. 3 Correlation between water film thickness and main meteorological factors

| 风速/m·s⁻¹ | 降水量/mm | 气温/℃ | 相对湿度/% | 路面温度/℃ | 前1 h水膜厚度/mm |
|---|---|---|---|---|---|
| −0.020 | 0.644** | −0.060* | 0.282** | −0.043 | 0.396** |

注：*、**分别表示通过0.05和0.01显著性检验。

因子之间的回归线性方程。表4给出了5—9月整体汛期水膜厚度与气象因子之间的回归方程、复相关系数和*F*统计量，路面水膜厚度与小时气温、小时相对湿度、小时降水量、前1 h水膜厚度有着较好的线性关系，决定系数为0.445，*F*统计量远大于临界值，回归方程通过0.01显著性检验。为提高水膜预报模型的准确性，分月求取汛期水膜厚度与气象因子之间的回归方程、复相关系数和*F*统计量（表4），各月路面水膜厚度与小时气温、小时相对湿度、小时降水量、前1 h水膜厚度表现出不同的线性关系。5月路面水膜厚度与小时相对湿度、小时降水量呈较好的线性关系；6月路面水膜厚度与小时降水量、前1 h水膜厚度呈较好的线性关系；8月路面水膜厚度与小时气温、小时降水量呈较好的线性关系；7月和9月路面水膜厚度与小时相对湿度、小时降水量、前1 h水膜厚度呈较好的线性关系。各月决定系数在0.418~0.508之间，*F*统计量均远大于临界值，回归方程通过0.01显著性检验。因此，5—9月整体和各月建立的回归模型方程可以作为预报方程。

**2.3.2 不同降水强度下水膜厚度模型构建** 根据2.2的研究结果，将2018—2020年5—9月高庙桥站和汉庄村站小时降水量按小雨、中雨、大雨和暴雨进行降水强度分级，采用多元逐步回归建立2018—2020年5—9月不同降水强度下水膜厚度与同期气象因子（小时风速、小时平均气温、小时相对湿度、小时路面温度、小时降水量、前1 h水膜厚度）的回归线性方程，回归方程均通过0.05的显著性检验，但复相关系数较小，不能满足预报要求。根据1 h降水量的大小将实际小时降水量划分为17区间（表略）；计算各区间小时平均降水量，建立小时平均降水量与水膜厚度的回归方程，方程均通过0.05的显著性，决定系数大于0.90，水膜厚度随小时平均降水量增加遵循幂函数（图6）。

**2.3.3 预报方程的检验** 图7给出了路面平均水膜厚度观测值、拟合值与预报值的曲线对比。可以看出，依据小时气象因子和不同降水强度下分别构建的水膜厚度模型，水膜厚度观测值和拟合值变化趋势基本一致。观测值和拟合值的相关系数均通过0.01的显著性检验。依据小时气象因子构建的水膜厚度模型的平均误差和均方根误差分别为−0.01和0.19，依据不同降水强度下小时平均降水量构建的水膜厚度模型的平均误差和均方根误差分别为0.01和0.18，因此，水膜厚度预报模型基本满足预报要求。

## 2.4 水膜厚度回归模型对比

季天剑[4]和罗京等[5]通过沥青路面水膜厚度试验获得了沥青路面水膜厚度回归方程。在研究降雨强度变化对路面水膜厚度影响时，对季天剑模型和罗京模型中路面表面构造深度（0.3 mm）、排水长度（3.0 m）、坡度（3.5%）统一取值，进而改变降雨强

表4 水膜厚度与主要气象因子各月回归方程、复相关系数和*F*统计量

Tab. 4 Complex correlation coefficient and *F* statistic of monthly regression equation between water film thickness and main meteorological factors

| 月份 | 回归方程 | $R^2$ | 显著性检验 | $F$ | 平均误差 | 均方根误差 | 观测值与拟合值相关系数 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 5 | $SM=-0.243+0.173\times R+0.004\times HU$ | 0.418 | 0.00 | 104.876 | 0.06 | 0.20 | 0.66 |
| 6 | $SM=0.040+0.138\times R+0.198\times SM_Q$ | 0.508 | 0.00 | 135.107 | 0.06 | 0.20 | 0.71 |
| 7 | $SM=-0.318+0.102\times R+0.004\times HU+0.118\times SM_Q$ | 0.459 | 0.00 | 97.436 | 0.06 | 0.22 | 0.68 |
| 8 | $SM=0.501+0.108\times R-0.023\times T$ | 0.428 | 0.00 | 151.763 | 0.05 | 0.22 | 0.65 |
| 9 | $SM=-0.226+0.096\times R+0.003\times HU+0.018\times SM_Q$ | 0.473 | 0.00 | 87.220 | 0.06 | 0.20 | 0.69 |
| 5—9 | $SM=-0.098+0.110\times R-0.005\times T+0.003\times HU+0.095\times SM_Q$ | 0.445 | 0.00 | 361.853 | −0.01 | 0.19 | 0.67 |

注：$R^2$为决定系数；$F$为统计量。SM为水膜厚度；$R$为小时降水量；$T$为小时气温；HU为小时相对湿度；$SM_Q$为前1 h水膜厚度。

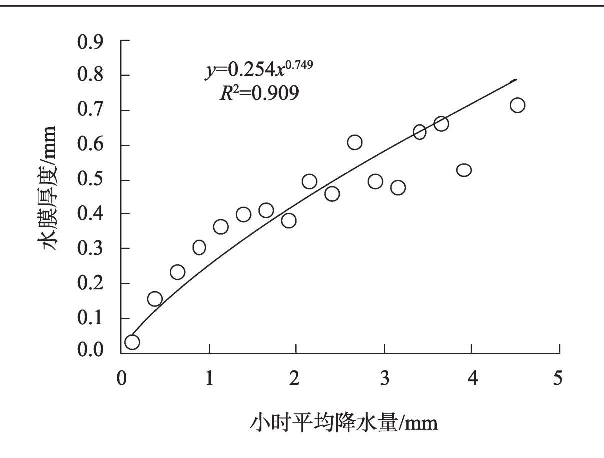



图6 水膜厚度随小时平均降水量的变化

Fig. 6 Variation of water film thickness with hourly mean precipitation

度大小，获得两种模型水膜厚度计算值。将两种模型水膜厚度计算值和本文不同降水强度下构建的水膜厚度模型结果进行对比，各模型对比结果如图8。

由图8可知，相同条件下，本文不同降水强度下构建的水膜厚度模型计算值明显高于其他两种模型。在变化趋势上，本文模型与罗京模型变化趋较一致，水膜厚度随降水强度增加增长趋势明显，季天剑模型水膜厚度计算值随降水强度增加增长趋势缓慢。

## 3 结 论

（1）2018—2020年汛期5—9月京藏高速公路高庙桥站和汉庄村站逐小时路面水膜厚度在0.0~0.2 mm之间的频率分别为66.0%和63.0%，0.2~0.4 mm之间的频率分别为19.4%和19.7%，0.5 mm以上的频率小于10.0%。水膜均值高庙桥站为0.215，汉庄村站为0.225；$C_v$分别为1.20和1.13，均属于强变异性。

（2）对水膜厚度值采用相对阈值法进行统计分析，给出了公路路面水膜厚度指数等级划分和影响建议并进行评价，发现2站水膜厚度在0.1 mm内的比例分别为33.8%和36.3%，路面水膜厚度在0.1~

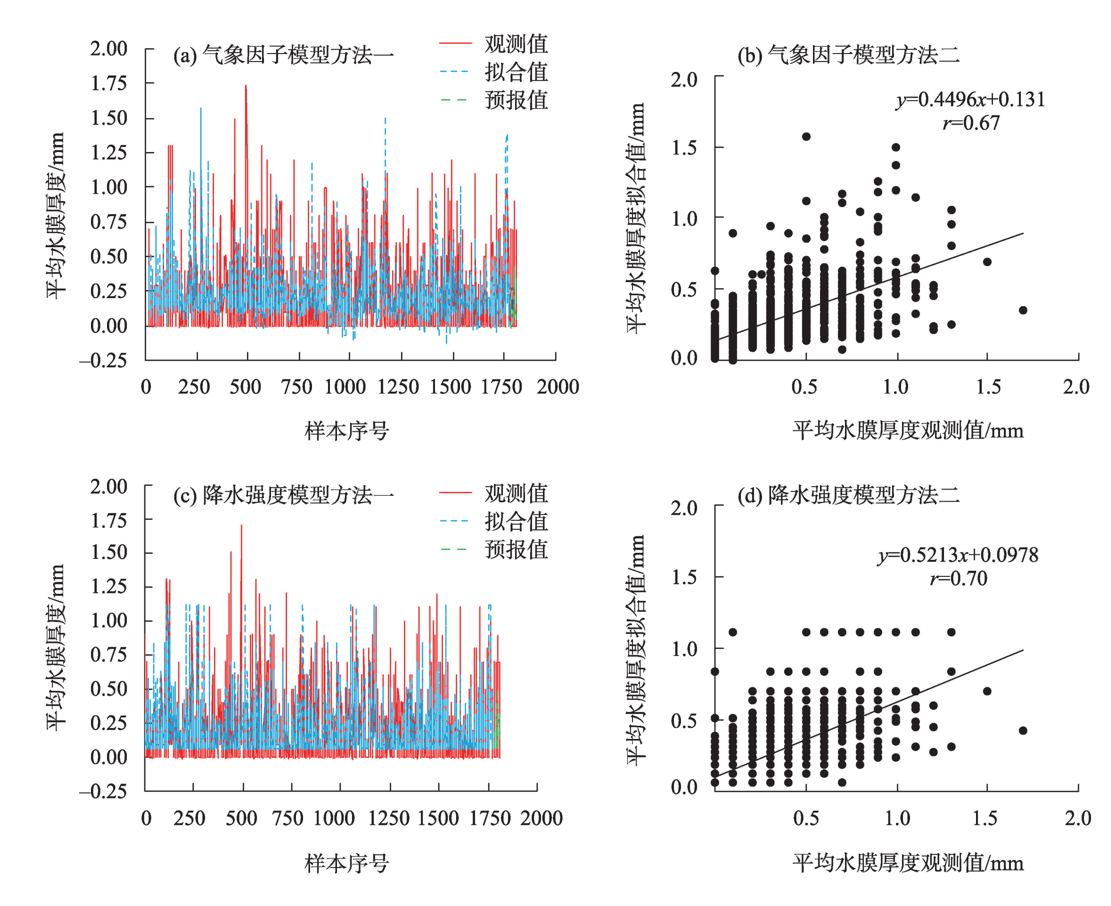



图7 路面水膜厚度观测值、拟合值与预报值的对比和相关分析

Fig. 7 Comparison and correlation analysis diagram of the observed value, fitted value and forecast value of pavement water film thickness

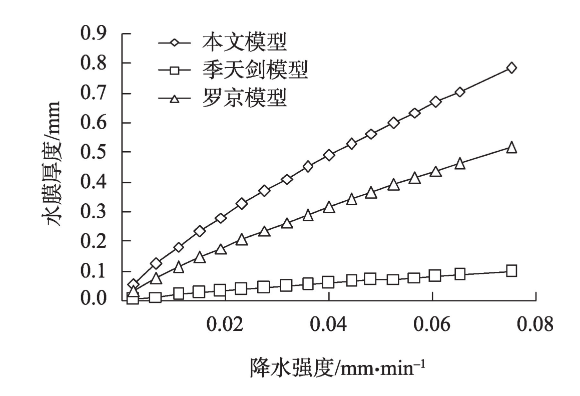



图8 各回归模型对比

Fig. 8 Comparison results of various regression models

0.6 mm之间的比例分别59.2%和56.0%，易发生水滑，引起车辆失稳、失控等危险的比例分别为7.0%和7.6%。

（3）京藏高速路面水膜厚度日变化和月变化特征明显。高庙桥站和汉庄村站水膜厚度的月变化均呈弱的双峰性，2站的月变化趋势不完全一致。高庙桥站最大值和次大值分别出现在5月和7月，最小值出现在6月，而汉庄村站最大值出现在8月，最小值出现在6月。$C_v$的变化与水膜厚度的变化相反，均属于强变异性。高庙桥站的日变化峰值出现在02:00—06:00，次峰值出现在12:00和19:00，低谷出现在14:00—16:00，汉庄村站日变化峰值出现在06:00，次峰值出现在13:00，低谷出现在16:00。

（4）随着降水强度的增加，平均水膜厚度均遵循幂函数关系迅速增加；在降水强度0.00~1.75 mm·h$^{-1}$时，平均水膜厚度增加趋势明显，降水强度大于1.76 mm·h$^{-1}$平均水膜厚度变化有增有减。

（5）通过逐小时降水量和水膜厚度间的相关关系分析，采用统计方法建立的依据气象因子和不同降水强度下分别构建的水膜厚度模型具有较好的使用价值，可在实际业务工作中推广应用。

（6）在相同条件下，本文在不同降水强度下构建的水膜厚度模型计算值明显高于季天剑模型和罗京模型。在变化趋势上，本文模型与罗京模型变化趋较为一致，水膜厚度随降水强度增加增长趋势明显，季天剑模型水膜厚度计算值随降水强度增加增长趋势缓慢。

## 参考文献（References）


[1] 单成昕. 汽车理论基础[M]. 北京: 人民交通出版社, 1990. [Shan Chengxin. Fundamentals of automobile theory[M]. Beijing: People's Communications Press, 1990. ]

[2] 罗京, 刘建蓓, 王元庆. 路面水膜深度预测模型验证试验[J]. 中国公路学报, 2015, 28(12): 57-63. [Luo Jing, Liu Jianbei, Wang Yuanqing. Verification test of water film depth prediction model for pavement[J]. China Journal of Highwayand Transport, 2015, 28(12): 57-63. ]

[3] 陈锋平. 道路表面水膜厚度理论计算模型分析[J]. 现代交通技术, 2014, 11(3): 12-15. [Chen Fengping. Study on the theoretical calculation model of rain water depth on road surface[J]. Modem Transportation Technology, 2014, 11(3): 12-15. ]

[4] 季天剑, 黄晓明, 刘清泉, 等. 道路表面水膜厚度预测模型[J]. 交通运输工程学报, 2004, 4(3): 1-3. [Ji Tianjian, Huang Xiaoming, Liu Qingquan, et al. Prediction model of rain water depth on road surface[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2004, 4(3): 1-3. ]

[5] 罗京, 刘建蓓, 戈普塔, 等. 路面水膜厚度检验评价方法[J]. 交通信息与安全, 2016, 34(6): 54-59, 82. [Luo Jing, Liu Jianbei, Ge Puta, et al. An inspection and evaluation method of thickness of water film on road surface[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2016, 34(6): 54-59, 82. ]

[6] AnkurMahesh B, Vandana G, Sanjay P, et al. Endodontic management of mandibular first molar with seven canals using cone-beam computed tomography[J]. Contemporary Clinical Dentistry, 2016, 7(2): 255, doi: 10.4103/0976-237X.183055.

[7] 王祎祚, 李光元, 张泽垚, 等. 雨天公路水膜厚度模型验证及行车安全性[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(29): 128-132. [Wang Yizuo, Li Guangyuan, Zhang Zeyao, et al. Verification of water film depth model and highway traffic safety in rain day[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(29): 128-132. ]

[8] 白永清, 何明琼, 刘静, 等. 高速公路交通事故与气象条件的关系研究[J]. 气象与环境科学, 2015, 38(2): 66-71. [Bai Yongqing, He Mingqiong, Liu Jing, et al. Study on the relationship between highway traffic accidents and meteorological conditions[J]. Meteorological and Environmental Science, 2015, 38(2): 66-71. ]

[9] 张晓美, 吕明辉, 王毅, 等. 我国公路交通气象灾害风险隐患特征分析[J]. 灾害学, 2019, 34(4): 19-24. [Zhang Xiaomei, Lü Minghui, Wang Yi, et al. Analysis on risk characteristics of highway traffic meteorological disasters in China[J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(4): 19-24. ]

[10] 保广裕, 杨春华, 周丹, 等. 京藏高速柴达木腹地路面温度变化特征及与气温要素影响分析[J]. 干旱区地理, 2021, 44(5): 1213-1221. [Bao Guangyu, Yang Chunhua, Zhou Dan, et al. Variation characteristics of road surface temperature and its influence on air temperature factors of Beijing-Tibet expressway in the Qaidam Hinterland[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(5): 1213-1221. ]

[11] 曾颖婷, 郭伟, 刘京雄. 基于WebGIS技术的精细化高速公路气象服务系统[J]. 气象与环境科学, 2018, 41(3): 132-137. [Zeng Yingting, Guo Wei, Liu Jingxiong. Precise highway weather ser-

vice system based on WebGIS technology[J]. Meteorological and Environmental Science, 2018, 41(3): 132−137. ]

[12] 张调风, 杨昭明, 温婷婷, 等. 青藏高原东北部区域持续性低温事件的特征及影响因子分析[J]. 干旱区地理, 2021, 44(4): 897−905. [Zhang Tiaofeng, Yang Zhaoming, Wen Tingting, et al. Characteristics and influencing factors of persistent low temperature events in northeast Qinghai-Tibet Plateau[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(4): 897−905. ]

[13] 王志, 韩焱红, 李蔼恂. 我国公路交通气象研究与业务进展[J]. 气象科技进展, 2017, 7(1): 85−89. [Wang Zhi, Han Yanhong, Li Aixun. Advance in research and operation in traffic meteorological service in China[J]. Advances in MeteoroIogical Science and TechnoIogy, 2017, 7(1): 85−89. ]

[14] 苗毅, 卢文清, 戴特奇, 等. 青藏高原市域综合交通优势度评价及空间特征——以林芝市为例[J]. 地理科学进展, 2021, 40(8): 1332−1343. [Miao Yi, Lu Wenqing, Dai Teqi, et al. Comprehensive traffic advantage degree and its spatial characteristics at the prefecture level on the Qinghai-Tibet Plateau: A case study of Linzhi City[J]. Progress in Geography, 2021, 40(8): 1332−1343. ]

[15] 宁贵财, 康彩燕, 陈东辉, 等. 2005—2014年我国不利天气条件下交通事故特征分析[J]. 干旱气象, 2016, 34(5): 753−762. [Ning Guicai, Kang Caiyan, Chen Donghui, et al. Analysis of characteristics of traffic accidents under adverse weather conditions in China during 2005—2014[J]. Journal of Arid Meteorology, 2016, 34(5): 753−762. ]

[16] 狄靖月, 王志, 田华, 等. 降水引发的西南地区公路损毁风险预报方法[J]. 应用气象学报, 2015, 26(3): 268−279. [Di Jingyue, Wang Zhi, Tian Hua, et al. A risk forecast method for southwest road damages based on precipitation[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2015, 26(3): 268−279. ]

[17] 李迅, 甘璐, 丁德平, 等. G2京津塘高速公路交通气象安全指数的预报研究[J]. 气象, 2014, 40(4): 466−472. [Li Xun, Gan Lu, Ding Deping, et al. Research on forecast of traffic weather safety index for Jingjingtang highway (G2)[J]. Meteorological Monthly, 2014, 40(4): 466−472. ]

[18] 汤筠筠, 李长城. 基于灰色聚类和层次分析法的汛期公路交通气象灾害后评估方法[J]. 公路, 2011(1): 171−177. [Tang Junjun, Li Changcheng. Post-evaluation method of highway meteorological disaster in flood seasons based on grey clustering and AHP[J]. Highway, 2011(1): 171−177. ]

[19] 武永峰, 张勇, 陈鲜艳, 等. 湖南省公路交通暴雨风险评价研究[J]. 自然灾害学报, 2011, 20(5): 148−154. [Wu Yongfeng, Zhang Yong, Chen Xianyan, et al. Assessment of rainstorm risk to highway in Hunan Province[J]. Journal of Natural Disasters, 2011, 20(5): 148−154. ]

[20] 魏璐. 河南省2011年高速公路气象服务效益评估[J]. 气象与环境科学, 2013, 36(2): 47−51. [Wei Lu. Benefits assessment of expressway meteorological service in 2011 in Henan Province[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2013, 36(2): 47−51. ]

[21] 周存秀. 京藏高速公路诺木洪至格尔木段路域生态环境现状研究[J]. 青海环境, 2011, 21(2): 86−90. [Zhou Cunxiu. Present state of ecological environment of Nuomuhong to Golmud section of Beijing-Tibet highway[J]. Qinghai Environment, 2011, 21(2): 86−90. ]

[22] 计晓龙, 吴昊旻, 黄安宁, 等. 青藏高原夏季降水日变化特征分析[J]. 高原气象, 2017, 36(5): 1188−1200. [Ji Xiaolong, Wu Haomin, Huang Anning, et al. Characteristics of the precipitation diurnal variation over Qinghai-Tibetan Plateau in summer[J]. Plateau Meteorology, 2017, 36(5): 1188−1200. ]

[23] 刘蓉娜, 张国庆, 肖宏斌, 等. 湟水河谷夏季云和降水的日变化特征[J]. 干旱区研究, 2010, 27(1): 135−141. [Liu Rongna, Zhang Guoqing, Xiao Hongbin, et al. Analysis on the characteristics of daily variation of cloud and precipitation over the Huangshui River valley in summer[J]. Arid Zone Research, 2010, 27(1): 135−141. ]

# Variation characteristics of pavement water film thickness in flood season and construction of forecast model for Beijing-Tibet Expressway in the eastern part of Qinghai

DAI Qingcuo[1,2], BAO Guangyu[2], QI Donglin[3], LI Yonghua[2], LIU Jiaru[2], ZHANG Jing[2], LI Baohua[2]

(1. Qinghai Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation, Xining 810001, Qinghai, China; 2. Qinghai Meteorological Service Center, Xining 810001, Qinghai, China; 3. Qinghai Institute of Meteorological Sciences, Xining 810001, Qinghai, China)

**Abstract:** The research uses the hourly measured data from the traffic automatic monitoring station along the Qinghai Provincial Highway of the Beijing-Tibet Expressway during the flood season (May-September) of 2018—2020, study the change feature of the variety of the pavement water film thickness, and finally build the forecast model between the water film thickness and meteorological factors. The results showed that: (1) The hourly pavement water film thickness at Gaomiaoqiao station and Hanzhuangcun station of Beijing-Tibet Expressway was mainly distributed between 0.0 mm and 0.2 mm, and the frequencies were 66.0% and 63.0%, respectively. There would be a small frequency (10.0%) when the pavement water film thickness over 0.5 mm, and both stations belong to strong variability areas. (2) The relative threshold method was used for statistical analysis, and it was found that the proportions of the pavement water film thickness within 0.1 mm at the two stations were 33.8% and 36.3%, respectively. The proportions of the pavement water film thickness between 0.1 mm and 0.6 mm were 59.2% and 56.0%, respectively. When the pavement water film thickness was over 0.7 mm, it is easy to slip, 7.0% and 7.6% of the vehicles were unstable and out of control respectively. (3) The daily and monthly variation characteristics of pavement water film thickness were obvious. The monthly variation of water film thickness at Gaomiaoqiao station and Hanzhuangcun station both showed a weak bimodal character, and the monthly variation trend of the two stations was not completely consistent. The peak of daily variation appeared at 02:00—06:00, and the low point appeared at 14:00—16:00, the peak appeared at 06:00 and the low point appeared at 16:00 at Hanzhuang Village station. (4) With the increase of precipitation intensity, the average water film thickness increased rapidly following the power function; when the precipitation intensity was between 0.00 $mm \cdot h^{-1}$ and 1.75 $mm \cdot h^{-1}$, the precipitation intensity was greater than 1.76 $mm \cdot h^{-1}$, and the average water film thickness increased and decreased. (5) The model of water film thickness based on meteorological factors and different precipitation intensities was established by using multiple regression statistical method, which has good operational value and can be popularized in practical work. (6) The calculated values of the water film thickness model under different precipitation intensities are significantly higher than those of the Ji Tianjian model and the Luo Jing model. The variation trend of the model presented in this article is more consistent with the Luo Jing model, the water film thickness increases obviously with the increase of rainfall intensity, and the calculated value of water film thickness increases slowly with the increase of rainfall intensity.

**Key words:** water film thickness; precipitation; forecast model; Beijing-Tibet Expressway